

## **FABRICACIÓN DE PAN. COMPARACIÓN CON LA ELABORACIÓN MEDIANTE ENERGÍA SOLAR. CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS**

V. Passamai<sup>1</sup>, T. Passamai<sup>2</sup> S. Pareja y G. Pinal<sup>3</sup>

Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales – INENCO - CONICET

Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta - CIUNSa

Avda. Bolivia 5150 - 4400 – Salta

**RESUMEN:** Se investigó la preparación de pan con una formulación determinada, comparando la cocción mediante horno solar de tamaño reducido y mínimo costo, con uno eléctrico que realiza el amasado previo. Se realizaron consideraciones energéticas para dicho horno eléctrico que permiten mostrar su sobredimensionamiento respecto del requerimiento mínimo para el horneado. Se demuestra experimentalmente la factibilidad de uso del horno solar tanto en verano como invierno, cuando se realizan operaciones especiales para este último caso.

**Palabras clave:** elaboración de pan, horno solar de pequeñas dimensiones, horno eléctrico.

### **INTRODUCCIÓN**

#### **Objetivos del trabajo**

En esta publicación se compara la cocción de pan realizada por vía solar, mediante un horno solar de pequeñas dimensiones (Passamai et al., 2007) con el que se obtiene con una máquina eléctrica para hacer pan (Howland, 2006). La formulación de la masa y su proceso de preparación es estándar y repetible, por lo que se toma como punto de partida para la experimentación por vía solar. A pesar del uso de una misma formulación para la masa, las recomendaciones habituales para los procesos mediante hornos industriales, difieren sustantivamente para nuestros propósitos, puesto que en ellos se elaboran muchas piezas de pan simultáneamente y son de mayor tamaño, dejando de tener validez en los casos que trataremos en este trabajo. Si son comparables al momento de analizar los procesos intrínsecos de las diferentes etapas que se presentan y describen. Estas permitirán comprender las etapas de cocción mediante las experiencias realizadas, adecuando procedimientos a usar, tendientes a optimizar las características del pan obtenido.

Se determina el consumo energético del horno eléctrico, para resaltar su desventaja al contrastar el uso de la energía solar, cuando el recurso está disponible, frente al costo del primero. Se desarrollan recomendaciones para el horno solar de pequeñas dimensiones y bajo costo, en cuanto a su aplicación para el horneado del pan denominado "básico", presentado en el manual del horno eléctrico.

Se comparan las propiedades organolépticas y otros aspectos del pan obtenido por vía solar, con las del horno eléctrico para ratificar o rectificar la justificación de su uso directo o complementado con horno familiar tradicional.

Se justifica el uso de la cocina solar de pequeñas dimensiones y costo mínimo como elemento pedagógico de fácil construcción y uso, a los fines de la difusión de la aplicación de la energía solar para la preparación del pan como alimento básico.

#### **Fenómenos que tienen lugar durante el horneado tradicional**

De acuerdo con la bibliografía específica consultada (Alvarado y Aguilera, 2001; Hayes, 1992 y Quaglia, 1991) el proceso de cocción de una porción de masa de pan consiste en una serie de transformaciones de tipo físico, químico y biológico, que permite obtener al final del mismo un producto comestible de características organolépticas y nutritivas apropiadas para su consumo.

Para hornos tradicionales, la temperatura y tiempo de cocción varían según el tamaño y el tipo de pan, oscilando entre 220 y 275 °C para la primera, mientras que el tiempo de cocción varía de acuerdo con la masa inicial. Para hornos eléctricos (Howland, 2006) se suele mencionar alrededor de 120 °C como máximo.

Una vez colocada la masa en el horno, el calor se propaga del medio ambiente al seno interno de la masa, atravesándola desde las capas externas al interior por un proceso de transmisión del calor por convección y conducción por lo cual el producto desarrolla un gradiente de temperatura. Esta no supera los 100 °C.

---

<sup>1</sup> Investigador del CONICET y del CIUNSa. Email: passamai@unsa.edu.ar

<sup>2</sup> Investigadora del CIUNSa. Email: pasamait@unsa.edu.ar

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería de la UNSa.

Durante esta fase se produce un movimiento (del interior hacia el exterior) de las moléculas de agua que se desplazan por la superficie que al llegar al exterior se evaporan, por ello la temperatura del producto tiende a disminuir hacia el interior.

Mientras se desarrolla la cocción hay una disminución de la cantidad de moléculas de agua que al llegar a la superficie exterior se convierten en vapor, por ello aumenta gradualmente la temperatura sobre la superficie externa y provoca la formación de la corteza, la que resultará tanto más gruesa cuanto más dure esta fase de la cocción. En caso de finalizar el flujo de agua, cesando completamente, se llega al punto de carbonización.

La formulación de la masa para pan (*receta*) no es universal, pero sabido es que tres son los elementos esenciales: harina, agua y levadura. La sal es un componente que puede considerarse esencial para darle gusto, aunque su proporción es mínima.

Con el aumento de la temperatura en el interior del pan ocurren una serie de fenómenos con transformaciones químicas, físicas y biológicas, a saber:

A una temperatura de 30°C: hay expansión del gas y producción enzimática de azúcares,

entre los 45 y 50 °C: se registra la muerte de los sacaromicetos,

a los 50 - 60 °C existe una fuerte actividad enzimática, comenzando la solubilización del almidón,

60 - 80 °C: finalización de la solubilización del almidón

100 °C: desarrollo y producción de vapor de agua, con formación de la corteza;

110 - 120 °C: formación de dextrina en la corteza (clara y amarillenta)

130 - 140 °C formación de dextrina parda

140 – 150 °C: caramelización (bronceamiento de la corteza)

150 - 200 °C: producto crujiente y aromático (pardo oscuro)

A más de 200 °C: carbonización de la pieza (masa porosa y negra).

### **Fenómenos físicos**

La masa que se halla en contacto con la base del horno absorbe el calor por conducción, la parte que está en contacto con el aire toma el calor por convección y por radiación. La penetración del calor en el interior de la masa ocurre de manera diferente en función de la temperatura de cocción y la calidad de la formulación o ingredientes. Una masa tierna requiere una temperatura más elevada que la que es necesaria para una masa dura, en la cual en caso contrario se produciría un agrietamiento debido a una desecación demasiado rápida.

Cuando se alcanza la temperatura 100°C, durante la cocción, el agua que se libera se evapora; evidentemente tal proceso ocurre superficialmente y, cuando esta migración se atenúa, se inicia la formación de la corteza, cuyo espesor dependerá de la duración de la parte final de la cocción.

En la cocción también se producen otros vapores por la volatilización de sustancias a temperaturas menores que 100 °C: alcohol etílico, aldehídos, éteres, ácidos, etc. todas sustancias aromáticas que se forman tanto por fermentación, como por la propia cocción. También existen productos derivados de la reacción de Maillard, entre azúcares y aminoácidos, que dan el aroma característico del pan. La volatilización depende también de la capacidad de retención de gas de la masa, de su impermeabilidad y en definitiva de la elasticidad del gluten. Una masa esponjosa tiene menor conducción del calor y requiere de mayor temperatura para lograr un efecto de cocción parejo.

### **Aumento del volumen del pan**

Debido a la dilatación del gas y el aumento de la presión del vapor de agua, según aumenta la temperatura del horno, la masa desarrolla un rápido incremento de volumen que adquiere un máximo después de un cierto tiempo (5 a 10 minutos), variable con el peso, la forma y la calidad de la masa.

Cuando la masa tiene la posibilidad de una elevada elasticidad junto a una gran capacidad de retención, da lugar a un pan muy grande con bajo peso específico y con una consistencia blanda uniforme. Si por el contrario, las características son de una masa de escasa elasticidad y/o pequeña capacidad de retención de gas debido a una malla glutínica rígida y escasa, se obtiene un pan de volumen pequeño, con miga de masa aglomerada y con alvéolos no homogéneos.

### **Fenómenos bioquímicos**

A temperaturas inferiores a 55 °C, la levadura continúa activa por lo que la fermentación prosigue. Si se llega a 65 °C, cesa

la actividad de la levadura y de las enzimas. Al mismo tiempo comienza la coagulación del gluten y la parcial dextrinización del almidón: la totalidad de estos fenómenos junto con la eliminación del agua hace perder a la pasta la consistencia plástica y adquiere una forma rígida.

La temperatura de cocción influye sobre otros componentes, tales como vitaminas (tiamina, riboflavina) cuyo contenido se reduce notablemente.

Como consecuencia de la distinta temperatura entre la superficie y el interior de la masa, el almidón se comporta de manera distinta: en el interior, de temperatura más baja, se convierte en engrudo, de estructura coloidal, formando la miga; sobre la superficie, la temperatura más alta provoca un proceso de dextrinización y caramelización de los azúcares presentes.

#### Efecto del vapor en la cocción del pan.

La mayor parte de los hornos están dotados de aparatos para producir vapor y en los hornos de calefacción intermitente se suele introducir un recipiente instalado en la cámara de cocción en el que se coloca agua que, a consecuencia de la temperatura, se evapora inmediatamente en el ambiente.

En un horno tradicional, el vapor se condensa sobre la superficie de la masa del pan a causa de la diferencia de temperatura entre el horno (220-250 °C) y la masa (25-30 °C), formando una sutil película.

La cocción en un horno saturado de vapor confiere a la corteza un color amarillo dorado y un brillo que no se produce en la cocción sin vapor, en la que sale un pan de color gris pálido y de aspecto opaco.

#### El rendimiento en pan

Se define rendimiento en pan a la relación entre el peso del pan obtenido y la cantidad de harina empleada. Si con 100 kilogramos de harina, se obtienen ciento veinte kilogramos de pan, el rendimiento en pan es del 120 %.

El peso del pan preparado se debe tomar luego de la cocción y enfriado una temperatura inferior a los 35 grados centígrados, tomada en el centro de la miga, pasadas las seis horas después de la cocción.

El rendimiento en pan tiene importancia porque es uno de los factores que determina el costo de la producción.

#### PREPARACIÓN DE PAN CON LA MÁQUINA ELÉCTRICA

Con una máquina para hacer pan ("Bread Machine"), modelo "HL-BM200" de la firma Howland (2006) se preparó una cantidad aproximada a 0,5 kg de pan, siguiendo la primer receta correspondiente al denominado "pan blanco básico". Durante esta experiencia, según se indica en la tabla 1, se midieron los pesos de los ingredientes usados, mediante una balanza Metler, ajustando la lectura a una décima de gramo de apreciación y el porcentaje relativo al peso total final de ingredientes, ajustado a la décima.

Ingrediente	Medida	Masa (g)	%
Harina	2 tazas	278,0	53,5
Leche	2 cdas.	16,0	3,1
Azúcar	1 ¼ cda.	15,0	2,9
Sal	1 cdita.	4,7	0,9
Levadura	1 cdita.	3,7	0,7
Agua	¾ taza	182,0	35,0
Aceite	2 cdas.	20,0	3,9
<b>Total Ingredientes</b>	-----	<b>519,4</b>	<b>100,0</b>
Pan preparado	-----	425,0	81,8
Agua evaporada	-----	94,4	18,2

Tabla 1: Ingredientes de una masa para pan.

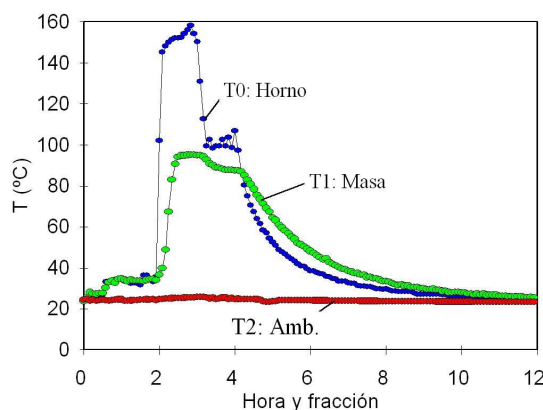


Figura 1: Temperaturas en el horno eléctrico.

Mediante un equipo de captación de datos Keithley 570 se tomaron las temperaturas correspondientes al aire dentro del horno, la masa de pan y el aire ambiente, durante todo el proceso de fabricación automática del pan, volcándose estos datos en la Figura 1.

La duración efectiva del proceso eléctrico fue de cuatro horas, durante las cuales se midió el consumo de electricidad mediante un medidor de corriente alterna monofásica Tipo E90b, marca Galileo, clase 2, contrastado con un patrón controlado por el INTI en base a normas IRAM (Passamai, V. et al. 2003). En la Figura 2a se muestran los datos obtenidos para el caso y en la 2b se observa el medidor empleado, de tipo doméstico.

Expresado en megajulios por kg de pan obtenido, el consumo fue de 3,18 MJ/kg.

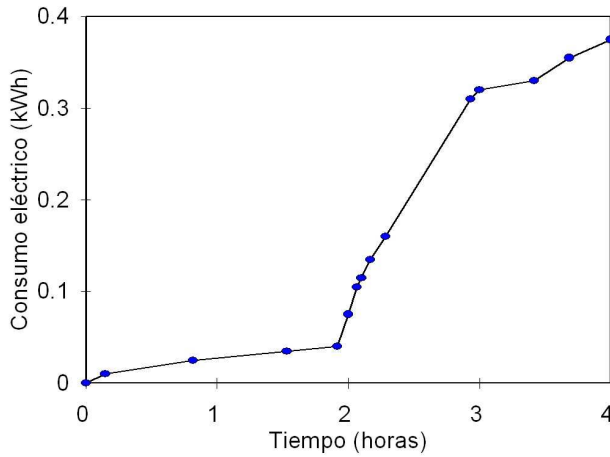


Figura 2a: Consumo eléctrico medido durante la preparación de pan con horno eléctrico. 2b: Medidor Galileo.

### CONSUMO DE ENERGÍA POR PARTE DE LA MASA DE PAN DURANTE EL HORNEADO ELECTRICO

Tomando como volumen de control la masa de pan durante todo el proceso, la ley de conservación de la energía establece (Incropera y De Witt, 1990):

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g - \dot{Q}_{out} = mcdT/dt + \lambda dm/dt \quad (1)$$

Donde:  $\dot{Q}_{in}$  es la cantidad de calor que entra al sistema,  $\dot{Q}_g$  el calor generado y  $\dot{Q}_{out}$  el conjunto de pérdidas al medio ambiente. Por otra parte,  $m$  es la masa,  $c$  su calor específico y  $\lambda$  el calor latente de vaporización del agua. La temperatura  $T$  es la medida durante el proceso y se indicó en la figura 1 como temperatura de la masa.

Despreciando el calor generado por el proceso de fermentación,  $\dot{Q}_g = 0$ . Por otro lado, se debe tener en cuenta la evolución de la temperatura a partir de la finalización del horneado, como se observa en la figura 1, durante la cual no hubo aporte de calor  $\dot{Q}_{in}$ , lo que permite expresar:

$$0 = mcdT/dt + UA(T-Ta) \quad (2)$$

suponiendo que las pérdidas se expresan como se hiciera en Passamai, 2007. Aquí,  $U$  es el coeficiente global de pérdida y  $A$  el área equivalente de la transferencia de calor desde la masa (a una temperatura  $T(t)$ ) al aire ambiente (que se mantuvo a la temperatura  $T_a$ ). Resolviendo la ecuación diferencial (2) y correlacionando con los datos del enfriamiento del pan preparado (despreciando la pérdida de agua), se obtuvo el valor de:

$$UA/mc = 1,46 \times 10^{-4} s^{-1}, \quad (3)$$

con un 2,2 % de error relativo respecto de los datos, con el cual es posible volver a la ecuación (1) y estimar los consumos energéticos involucrados.

A tales efectos, se puede considerar la correlación del calor específico de la masa de pan con el contenido de agua porcentual,  $H$ , de acuerdo con Alvarado y Aguilera, 2001:

$$c = (1130,44 + 30,56 H) J/kg \quad (4)$$

Suponiendo que el calor absorbido,  $\dot{Q}_a$ , por la masa de pan durante el horneado es:

$$\dot{Q}_a = mc dT/dt + UA(T-Ta) + \lambda dm/dt \quad (5)$$

En los tramos donde la temperatura de la masa es aproximadamente constante, como se observa en la figura 1, se tiene que  $dT/dt=0$ , con lo cual se puede escribir, para los tres sectores donde ocurre esto y el intermedio donde sube la temperatura de la masa:

$$\dot{Q}_a = (UA)_1(T-Ta) + m c dT/dt + (UA)_2(T-Ta) + (UA)_3(T-Ta) + \lambda dm/dt \quad (6)$$

Tomando el dato inicial del 35 % para el contenido de agua en la masa,  $(UA)_1=0,167 W/K$ , junto con la (3) y la tabla 1. Por otra parte, suponiendo un valor promedio entre el inicial y el final, se obtiene  $(UA)_2=0,138 W/K$  y, con el valor final de agua (20,6 %),  $(UA)_3=0,109 W/K$ .

De la integración de (6) a lo largo del tiempo del proceso respectivo, se obtiene:  $Q_t = \int \dot{Q}_a dt$ , o sea:

$$Q_t = (UA)_1(T-T_a) \Delta t_1 + m c \Delta T + (UA)_2(T-T_a) \Delta t_2 + (UA)_3(T-T_a) \Delta t_3 + \lambda m a \quad (7)$$

Aquí  $ma$  es la masa total de agua evaporada.

Reemplazando los valores experimentales:

$$Q_t = (6.691,8 + 37.689,4 + 1.9050,0 + 69.704,7 + 424.060,0) J = 557.195,9 J \quad (8)$$

En valores porcentuales:

$$100 \% = 1,2 + 6,8 + 3,4 + 12,5 + 76,1 \quad (9)$$

La mayor parte del calor usado por la masa (76 %) corresponde a la evaporación de agua.

Referido al total de pan obtenido, 0,425 kg, este valor de consumo energético resulta ser 1,3 MJ/kg.

Comparativamente, el horno eléctrico entrega una cantidad que es 2,5 veces la necesaria para el horneado.

Las fotografías de la figura 3 muestran las secuencias desde la masa inicial y el producto final dentro del horno eléctrico.



Figura 3: evolución de la masa de pan durante el horneado eléctrico (ver las fotografías en colores, preferentemente).

## PREPARACIÓN DE PAN MEDIANTE LA COCINA SOLAR DE PEQUEÑAS DIMENSIONES

La cocina solar de pequeñas dimensiones (Passamai, 2007) fue utilizada para mostrar su funcionamiento equiparable al de una cocina solar de tipo caja, empleándose agua como elemento para las experiencias (Passamai y Passamai, 2002). En este trabajo, se decidió ponerla a prueba para preparar pan, con el propósito de poder comparar resultados con el horneado común. Con tal motivo, la cocina solar se denomina aquí “horno solar de pequeñas dimensiones”.

### Experiencia 1: En época de verano (diciembre)

La figura 4 corresponde a los datos registrados para un día despejado en que se realizó una experiencia de cocción de pan con el horno solar, con buenos resultados (color del pan, sabor, etc.).

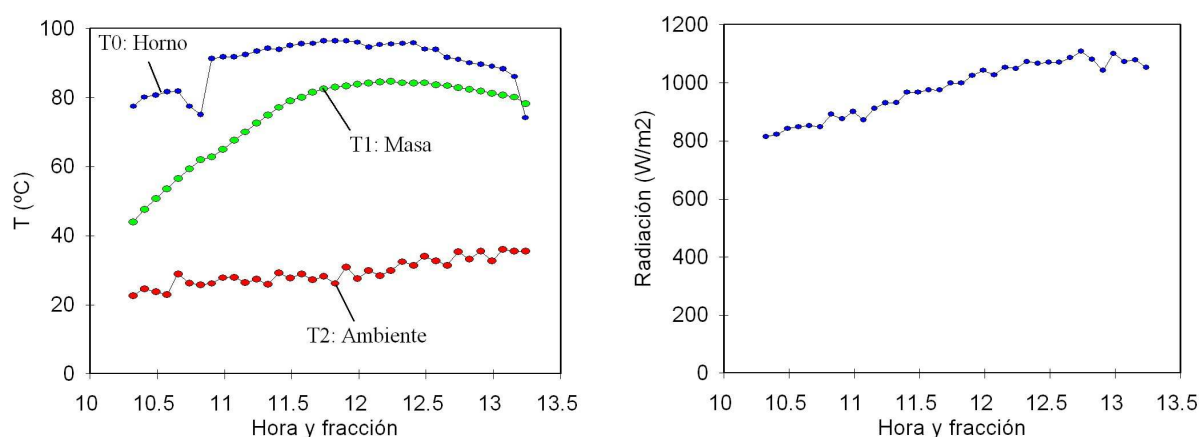


Figura 4: Datos de temperaturas y radiación solar para el horneado de pan en el horno solar de pequeñas dimensiones.



Figura 5: Aspecto del pan horneado en la cocina solar de pequeñas dimensiones, en época de verano.

El registro fotográfico del producto final muestra un buen aspecto en cuanto a coloración de la corteza, acorde con lo establecido en la bibliografía consultada para este trabajo, no obstante que la temperatura equivalente al horno (aire dentro de la olla o cacerola empleada) no llegó a 100 °C. En el interior, la miga presentó una coloración pareja, bronceada y de aspecto esponjoso. Esto se indica en la figura 5. Su sabor no se diferenció marcadamente con respecto al horneado eléctrico. La duración del proceso fue de 3,5 horas.

## Experiencia 2: En estación invernal (julio-agosto), con masa completa y sin extracción de humedad.

Se efectuó la experiencia de elaboración de pan, en invierno, con igual masa inicial que en el caso de la experiencia 1. Se observó que el proceso de fermentación fue incompleto, que la base del pan preparado estaba húmeda, el aspecto final era de pan blando y sabor algo crudo. La figura 6 muestra la evolución de temperaturas y radiación, desde la masa que fuera preparada en la máquina para hacer pan.

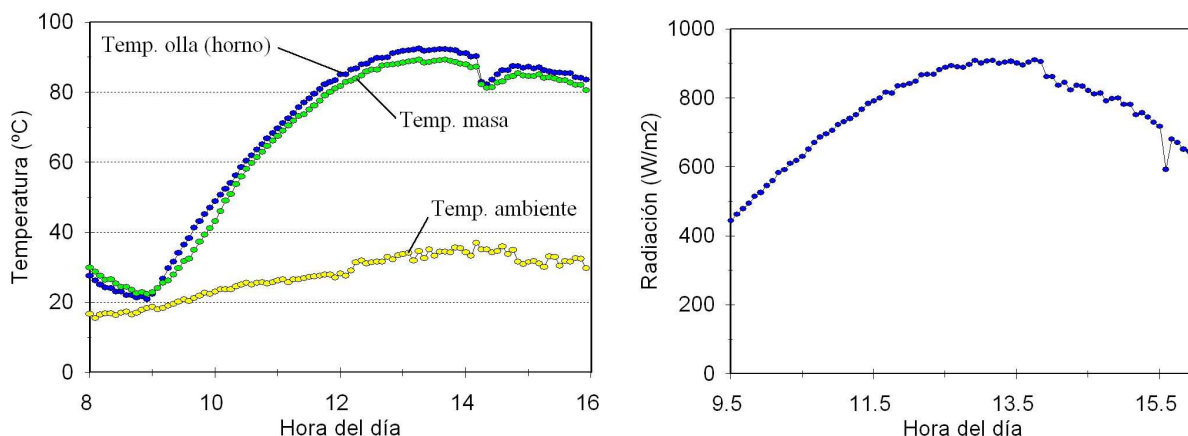


Figura 6: Datos de temperaturas y radiación solar para el horneado de pan en la cocina solar de pequeñas dimensiones.

Se observa que la masa inicialmente tibia sufrió una reducción de su temperatura para luego incrementarla a medida que aumentó la radiación solar. El tiempo empleado se duplicó respecto al correspondiente al horno eléctrico, normalmente de cuatro horas.

La figura 7 muestra el efecto obtenido sobre el pan de una sola pieza, tanto dentro de la bolsa transparente que encierra el recipiente (alto contenido de humedad), como una vez finalizado el proceso (déficit en el proceso de levado por fermentación).



Figura 7: Secuencias de producción de humedad no evacuada y bajo aumento de volumen del pan.

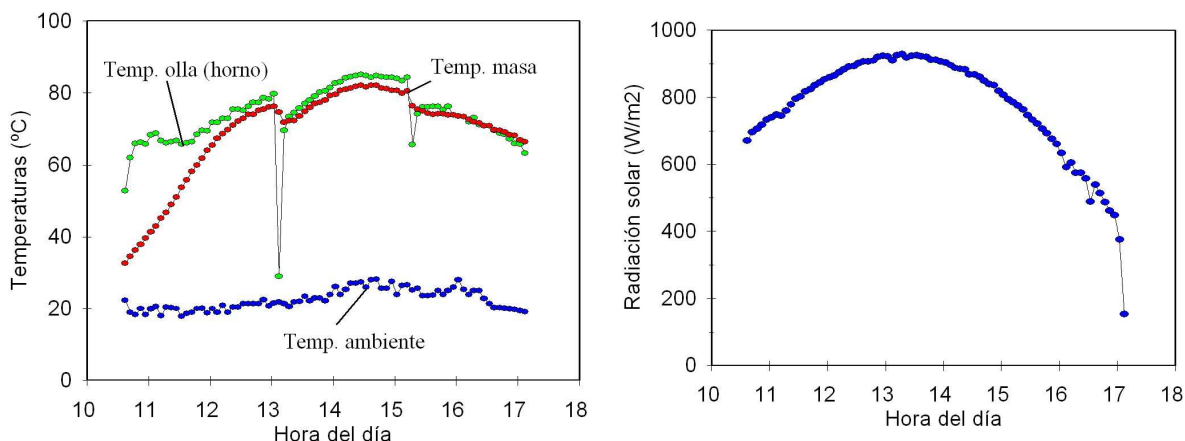


Figura 8: Datos de temperaturas y radiación solar para el horneado de pan con extracción de humedad.



### **Experiencia 3: En estación invernal (julio-agosto), con masa completa y con extracción de humedad.**

En vista al resultado anterior, se realizó una experiencia de horneado con extracción periódica de la humedad, mediante apertura y cambio de la bolsa transparente. Se logró un buen levado del pan, pero el aspecto final fue sin el bronceado típico de formación de buena corteza y la base siguió húmeda, como en el caso precedente. La figura 8 muestra los datos obtenidos para las condiciones de temperaturas y radiación.

Las bajas de temperaturas del aire dentro de la olla obedecen a las instancias en que se cambió la bolsa transparente para extraer humedad. El resultado fue que el aspecto de la masa mejoró notablemente, en cuanto al volumen por fermentación de la levadura, así como el de bronceado de la corteza. Esto se observa en las fotografías de la figura 9.



*Figura 9: Mejoramiento en el levado del pan y aspecto de la corteza.*

Luego de probado este pan, su aroma marcó una diferencia respecto al del obtenido en la experiencia anterior, sin ser óptimo, pues se pudo percibir falta de cocción. Se completó en horno a gas natural de cocina tradicional, calentando durante cinco minutos, obteniéndose una notable mejora, tanto en su aspecto visual como en su sabor.

### **Experiencia 4: En estación invernal, con masa total fraccionada y cocción simultánea en tres cocinas solares.**

En vista a los resultados anteriores, se decidió realizar una variante consistente en la disminución de la masa de pan dentro del horno solar, mediante su fraccionamiento en seis piezas similares, distribuidas en tres cocinas solares, en número de tres, dos y una, respectivamente, como se indica en la secuencia fotográfica de la figura 10.



*Figura 10: Fraccionamiento de la masa inicial de pan en tres recipientes iguales.*

Al registrarse que la base de los productos seguía con alto contenido de humedad, se decidió darlos vuelta al promediar la misma, lográndose el efecto de secar y mejorar la formación de la corteza, con un bronceado adecuado, como se observa en la figura 11, luego de finalizado el proceso.



*Figura 11: Aspecto final mejorado del pan obtenido con horno solar de tamaño reducido, en invierno.*

### **CONCLUSIONES.**

La comparación entre los panes elaborados en los hornos analizados, presenta características con diferencias marcadas según la época del año, que son desfavorables para la cocina solar respecto al horno eléctrico, cuando la estación es la invernal, si no se realiza ninguna operación adicional.

Al disminuir la masa contenida en cada horno solar de dimensiones reducidas, a lo sumo hasta alrededor de 250 g, con extracción periódica de la humedad e inversión de la masa dentro del recipiente, se puede lograr un horneado aceptable aún en invierno.

El objetivo de demostrar que el horno solar de dimensiones reducidas y mínimo costo permite su uso para la preparación de

pan, es así alcanzado satisfactoriamente.

## REFERENCIAS

- Alvarado, J. de D. y Aguilera, J. M.: Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos, 2001. Ed. ACRIBIA S.A., España.
- Hayes, G. D.: Manual de datos para ingeniería de los alimentos, 1992. Ed. Acribia, S. A. España.
- Howland: Máquina para hacer pan. Mod. HL-BM200. Manual de instrucciones. 2006.
- Incropera, F. P. y De Witt, D. P.: Fundamentals of heat and mass transfer, 1990. Wiley.
- Passamai, V. y Passamai, M.: Experiencias con cocinas solares tipo cookit de costo mínimo. 2002. AVERMA, Vol. 6, 10.33-10.36.
- Passamai, V., Passamai, M., Bernaski, M. y Passamai, T.: Evaluación del consumo energético para la cocción. Estudio de caso. 2003. AVERMA, Vol. 7, 8.73-8.78.
- Passamai, V., Passamai, T., Pareja, S. y Pizarro, L.: Física térmica de una cocina solar de pequeñas dimensiones, 2007. AVERMA, Vol. 11, 8.38-8.42.

Quaglia, G.: Ciencia y tecnología de la panificación, 1991. Ed. Acribia, S. A. España

**ABSTRACT:** The preparation of bread with a determined formulation was investigated, comparing baking by means of a small solar oven and minimal cost, with the elaboration by means of an electric oven. Energy considerations were carried out for the electric oven, showing a great value with reference to the minimal requirement for baking. Experiments show the feasibility of the solar oven both in summer so as winter, when special operations are carried out for the former case.

**Keywords:** bread baking, small solar oven, electric oven.